L'IMMAGINARIO SCIENTIFICO NOTIZIE

"Io non so che cosa possa aver pensato di me il mondo, ma per conto mio mi sembra di essere stato come un fanciullo che, giocando sulla riva del mare, si sia divertito a trovare, di quando in quando, un ciottolo più liscio o una conchiglia più bella dell'ordinario, mentre l'immenso oceano della verità stava davanti a me ancora tutto da scoprire". Isaac Newton

Dicembre 1992 • N° 8 – Nuova serie – *Edizione speciale*

EPPUR SI MUOVE

La nostra vita quotidiana si fonda su alcune certezze, non ultima delle quali è la stabilità della terra su cui poggiamo i nostri piedi ed edifichiamo le nostre case. Chi abbia vissuto l'esperienza di un terremoto, sa quale strana, globale sensazione di sconvolgimento provochino anche brevi sussulti del suolo. Poi però, passato lo spavento, di solito torna a regnare la necessaria convinzione che la Terra se ne stia buona e ferma, permettendoci docilmente di realizzare i nostri piani.

Gli articoli che presentiamo mostrano invece che la Terra non obbedisce affatto a quest'immagine, presupposto della nostra civiltà ingegneristica. Che, anzi, i terremoti non sono che l'ultimo effetto del continuo movimento di masse, che più o meno dense e più o meno rigide, si spingono, si accavallano e si sfregano sotto di noi. E che i tempi con cui si muove la Terra, anche se solitamente non si tratta di movimenti percepibili con gli occhi, non sono però così incomparabilmente più lunghi di quelli della Storia.

Siamo felici di presentare all'attenzione dei nostri lettori questo panorama — non certo completo, ma già stimolante — delle ricerche nel campo dei movimenti della crosta terrestre. Tanto più perché l'immaginazione scientifica, l'amore della natura e lo spirito di esplorazione e di avventura che costituiscono il cuore delle scienze della Terra siamo sicuri troveranno riscontro in una città che non a caso ha prodotto e ospitato ricercatori e istituti di ricerca in questo campo di livello e fama nazionale e internazionale.

Una sfida tra giganti

Il progetto Ev-K2-CNR

Ardito Desio

Il 7 marzo 1987 il «New York Times» annunciava che il K2, e non l'Everest, era la montagna più alta del mondo con una quota di 8859 metri, superiore di 11 centimetri a quella dell'Everest. La misura era stata effettuata dall'astronomo George Wallerstein dell'Università di Washington durante una spedizione alpinistica statunitense con un modernissimo apparecchio, noto con la sigla GPS (Global Positioning System, vedi la scheda a p. 2) con cui si possono ottenere direttamente la latitudine, la longitudine e l'altitudine della stazione di misura, utilizzando i segnali emessi dai satelliti artificiali. Questa notizia suscitò in me in un primo tempo grande entusiasmo, ma ben presto mi resi conto che per averne conferma era necessario misurare con gli stessi strumenti e, se non contemporaneamente, a breve distanza di tempo, anche l'altezza dell'Everest. Da queste considerazioni e con l'aiuto finanziario del CNR ha avuto inizio la spedizione del 1987 che, in un mese, sotto la direzione del prof. Alessandro Caporali, ha effettuato la misurazione sia dell'Everest che del K2. Il risultato — del resto previsto — fu che il primo era effettivamente più alto del secondo. Le quote allora ottenute furono di 8872 metri anziché di 8848 metri (ottenuta con metodi tradizionali) per l'Everest, e di 8616 metri, anziché 8611 metri, per il K2.

Dopo questi risultati mi proposi di ripetere negli anni successivi le misure con una più completa preparazione. Così, sempre con il sostegno finanziario del CNR, ebbe inizio una serie di spedizioni con compiti scientifici sempre più ampi, le quali si susseguirono annualmente dal 1988 all'anno in corso. I programmi di ricerca delle spedizioni sono inerenti a discipline scientifiche fra loro anche molto diverse: scienze della Terra, scienze ambientali, medicina, biologia, scienze umane, ricerca tecnologica. Nel frattempo il gruppo industriale EFIM mi offriva una piramide in alluminio e vetro (alta circa 8 metri e con i lati di circa 13 metri) che doveva servire da laboratorio per le ricerche scientifiche e che, in accordo con l'Accademia Cinese delle Scienze, avevo progettato di collocare sul versante nord dell'Everest sui 5000 metri. Le note vicende di piazza Tien An Men hanno impedito tale realizzazione, per cui, d'accordo con gli operatori scientifici, ho pensato di trasferire l'ubicazione della piramide sul versante sud dell'Everest alla medesima altezza. Nel 1990 la piramide venne finalmente trasportata via mare a Calcutta e di là a Kathmandu, donde con 1500 portatori venne finalmente portata a destinazione, sotto la cima dell'Everest a 5050 metri d'altezza. Da allora l'attività scientifica si è molto espansa coinvolgendo ricercatori di una decina di paesi europei, oltre a quelli del Nepal e del Pakistan.

Nel 1992 ha avuto finalmente attuazione uno dei compiti del programma iniziale, la misura dell'altezza dell'Everest con le apparecchiature più moderne. È nata così la spedizione scientifico-alpinistica che nel mese di settembre ha portato a termine l'impresa grazie alla collaborazione di una decina di alpinisti. Questi, sotto la direzione di Agostino Da Polenza, si erano proposti di scalare l'Everest. Vi sono riusciti quasi al completo, mentre gli scienziati del progetto Ev-K2-CNR, diretti dal prof. Giorgio Poretti dell'Università di Trieste, coadiuvato dal prof. Claudio Marchesini e dal dott. Alberto Beniat dell'Università di Udine, hanno svolto al completo il loro compito. Le operazioni si sono svolte simultaneamente in due opposti versanti della montagna. Sul versante nepalese ha operato il gruppo di Poretti con la collaborazione degli alpinisti francesi, con a capo Benoit Chamoux (scalatore di 9 cime di 8000 metri). Sul versante tibetano le operazioni sono state dirette dal prof. Yunjong Chen, direttore del National Bureau of Surveying and Mapping della Cina, con un centinaio fra operatori e personale ausiliario. Il 29 settembre è stato trasportato sulla vetta da Chamoux con la nostra guida alpina Oswald Santin un treppiede destinato a servire di mira alle due stazioni di Poretti e Chen e un GPS. Grazie a un periodo di eccezionale bel tempo le misurazioni sono state interamente effettuate e ora è in corso l'elaborazione dei dati registrati dagli strumenti. Il risultato definitivo si potrà avere fra qualche mese, e cioè verso il febbraio del prossimo anno. Come si è visto la misurazione altimetrica dell'Everest è stata il frutto di una perfetta collaborazione fra una quarantina di operatori fra scienziati, tecnici e alpinisti di quattro nazionalità, italiana, francese, cinese e nepalese.

L'avventura della piramide

Giorgio Poretti, Dipartimento di Scienze Matematiche, Università di Trieste

Il 29 settembre 1992, un gruppo di ricercatori italiani, appostati sul lato destro del ghiacciaio del Khumbu in territorio nepalese, e un gruppo di topografi cinesi in territorio tibetano hanno effettuato una nuova misura dell'Everest facendo uso della strumentazione topografica attualmente più avanzata. Questa misura fa parte di un progetto di ricerca sui movimenti della crosta terrestre in Himalaya e in generale dell'India, che lentamente si sta insinuando sotto il continente eurasiatico.

La tecnologia di posizionamento satellitare (GPS, vedi scheda p. 2) permette di seguire nel tempo gli eventuali spostamenti della crosta terrestre. Con questa tecnica, nel 1991, è stata stabilita una rete di 40 punti compresi tra la pianura del Gange e l'altopiano Tibetano e disposti a cavallo delle maggiori faglie della catena himalayana. La rete si estende in Tibet fino a oltrepassare la linea di sutura tra la placca indiana e quella eurasiatica e verrà rimisurata ogni 3-5 anni.

Uno dei punti di questa rete è situato vicino alla piramide del Progetto Ev-K2-CNR, a quota 5050, ed è collegato con un punto della rete mondiale Doris gestita dall'Institute Geographique National di Parigi. Dodici punti di questa rete sono situati in territorio tibetano e le misure su di essi sono state effettuate dall'Istituto Topografico Cinese (NBSM). Quando, nel novembre 1990 l'Italia ha proposto una nuova misura dell'Everest, i cinesi si sono associati con entusiasmo. Certamente il consenso e la collaborazione dei cinesi era un buon avvio per il progetto, ma i problemi che poneva la sua realizzazione erano colossali.

Innanzitutto l'organizzazione della spedizione alpinistica e la ricerca dei finanziamenti. Agostino da Polenza, alpinista e *general manager* del Ev-K2-CNR, si occupò completamente della spedizione e, grazie al patrocinio del Ministero dell'Ambiente e all'appoggio della Baume e Mercier, riuscimmo ad avere a disposizione cinque scalatori. Il prof. Desio aveva accolto il progetto con grande entusiasmo dimenticando, per un momento, gli aspetti finanziari e le difficoltà. I finanziamenti comunque arrivarono dal CNR e dalla CEE che avevano già finanziato le campagne gravimetriche, il progetto di rete GPS e altre ricerche del nostro gruppo.

L'arrivo degli sherpa alla piramide ai piedi dell'Everest.

La cima dell'Everest.

Poi occorreva pensare alla strumentazione. L'Enel, il Servizio Sismico Nazionale, l'Agenzia Spaziale Italiana, la Datameteo, il Laboratorio CNR per le Ricerche Geotermiche e la rappresentante italiana della Leica ci hanno messo a disposizione tutti gli strumenti di misura: due distanziometri, due teodoliti, tre GPS, un gravimetro, un tedolite attrezzato per le letture astronomiche collegato con due GPS e un computer, due treppiedi speciali con due gruppi di prismi riflettenti, una stazione meteorologica da collocare in vetta, una stazione ricevente in valle in grado di memorizzare i dati. Infine tutta l'apparecchiatura necessaria per il lancio di palloni sonda atmosferici e per la ricezione dei loro dati.

La data della partenza si avvicinava e la sensazione di stare dimenticando qualcosa di essenziale diventava sempre più forte. All'officina meccanica del Dipartimento di Scienze Matematiche dell'Università di Trieste stavano costruendo i chiodi da ghiaccio e le prolunghe necessarie per sostenere l'asta centrale del treppiede e il GPS. Occorreva una scatola per l'isolamento termico e il sistema di riscaldamento del GPS. Bisognava poi controllare che gli strumenti funzionassero fino alla temperatura di -40°C e alla pressione di 9000 metri; imparare come si lanciano i palloni sonda e programmare il sistema di ricezione; cercare (invano) una compagnia di assicurazione per la strumentazione; preparare i documenti per l'esportazione della strumentazione. E così via.

La spedizione partì il 15 settembre 1992. Arrivati a Kathmandu, cominciarono le sorprese. Gli alpinisti erano già arrivati al campo 2 e forse si sarebbe anticipato l'arrivo in vetta di una settimana. Il gruppo geodetico aveva però previsto di salire lentamente da Lukla fino alla piramide portando avanti le misure di livellazione. Era quindi necessario accelerare i tempi e mandare avanti gli strumenti con l'elicottero: il giorno della partenza abbiamo finito di sistemare gli strumenti alle 2.30 di notte, alle 6 si partiva per Lukla.

Il secondo inconveniente è stata la malattia di uno di noi, Marchesini. Mal di gola causato dall'aria condizionata a Kathmandu e febbre da cavallo all'arrivo a Lukla. Lo abbiamo lasciato con un termometro in bocca e la fatidica frase «Domani, appena ti rimetti, prendi due portatori e ci raggiungi». Ci rivedemmo a Trieste un mese dopo.

Il giorno 24 arrivammo alla piramide dopo la terribile salita da Pheriche a Lobuche lungo tutto il fronte del ghiacciaio del Khumbu. Anche alla piramide trovammo brutte sorprese. Era piena di medici: pneumologi, fisiologi, cardiologi, persino due dentisti. Per noi non c'era posto, né per dormire né per controllare gli strumenti. Dormire in tenda non era un

(Segue in ultima pagina)

topografando...

Claudio Marchesini, Università di Udine

Il 29 settembre 1992 è stata eseguita una nuova misura della quota dell'Everest. Per la prima volta sono state effettuate, oltre alle usuali misure di angoli verticali, anche misure di distanza ed è stato installato in vetta un ricevitore satellitare GPS. I topografi italiani e cinesi hanno sistemato gli strumenti in sei punti nelle due valli ai piedi dell'Everest (tre in Nepal e tre in Tibet) da cui sono state eseguite le misure degli angoli verticali e delle distanze mirando, per i primi a un cilindro formato da strisce di seta rossa, per le seconde a due gruppi di tre prismi orientati verso le due valli. Per calcolare la quota di un monte sarebbe sufficiente un solo punto, ma se si hanno a disposizione più punti si ottengono più determinazioni della quota che, confrontate, permettono di controllare l'affidabilità dei risultati. Per la stessa ragione le misure vengono eseguite da entrambi i versanti; infatti le quote dei punti in valle provengono da due caposaldi di riferimento diversi: uno posto sulle rive dell'Oceano Indiano e uno del Mar Giallo. Ogni misura deve essere sempre accompagnata dall'indicazione dell'errore e così sarà anche per l'Everest. L'errore di misura non è eliminabile, si può solo cercare di renderlo il più piccolo possibile.

La misura dell'altezza dell'Everest rispetto ai punti in valle è tutto sommato più semplice della misura della sua quota, ossia dell'altezza rispetto al livello medio del mare. Per calcolare la quota bisogna infatti portare idealmente il livello del mare sotto la cima della montagna. Questa operazione comporta una lunga serie di misure di livellazione e quindi di errori di misura che, per distanze molto lunghe, sono decisamente superiori all'errore della misura dell'altezza della montagna rispetto ai punti in valle. Nel nostro caso ci si aspetta che le quote di livellazione riferite rispettivamente al Mar Giallo e all'Oceano Indiano saranno piuttosto diverse nel punto d'incontro (al confine fra il Tibet e il Nepal) e se ne farà una media alla quale riferire la nuova quota dell'Everest.

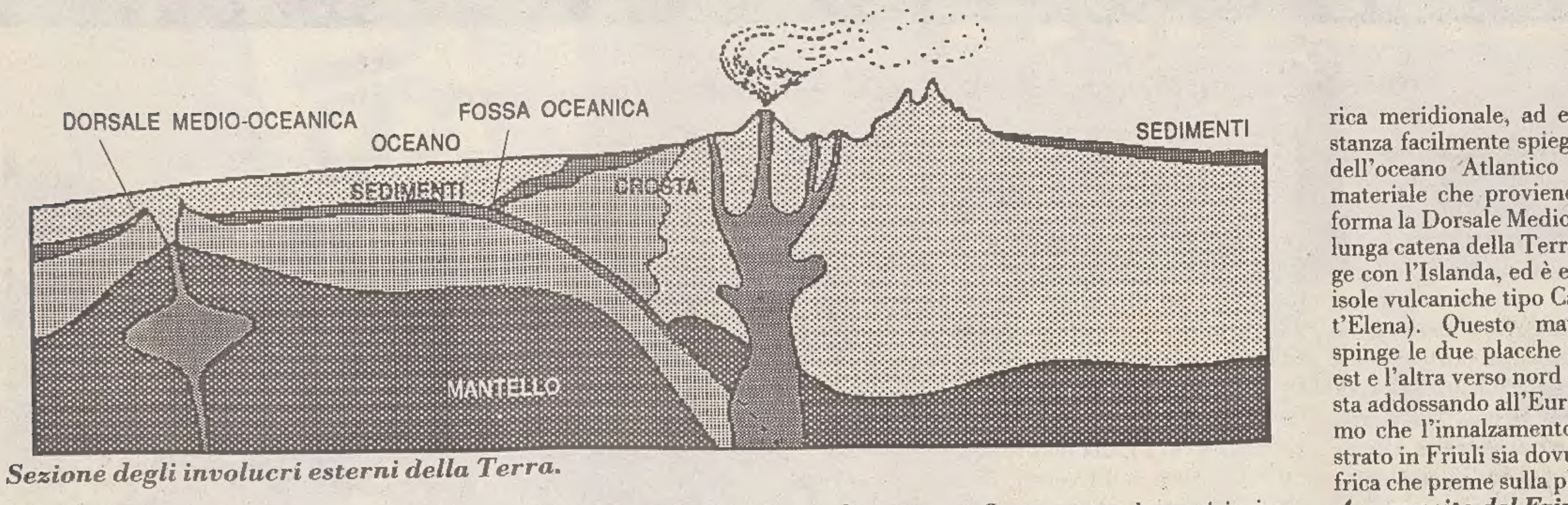
Un'altra fonte d'errore è costituita dall'atmosfera, che è estremamente mutevole; le variazioni di temperatura e di pressione influiscono sul valore sia della distanza che dell'angolo, per cui è stata posta la massima cura nella misura dei parametri atmosferici in valle, sulla vetta e lungo il percorso del raggio di misura.

L'andamento irregolare della superficie orizzontale (*geoide*) introduce delle deviazioni nella direzione della verticale, che sono state misurate prendendo come riferimento alcune stelle da punti di coordinate geografiche note.

Gli angoli sono stati misurati con teodoliti a lettura elettronica e per le distanze sono stati usati i distanziometri più precisi esistenti sul mercato. Uno dei distanziometri impiegati usa come sorgente luminosa un diodo-laser che emette nell'infrarosso (quindi il raggio non è visibile), l'altro invece usa un laser che emette luce rossa. In quest'ultimo caso il raggio si vede e permette di orientare meglio i prismi riflettenti. Oltre ai citati strumenti topografici «classici» sono stati impiegati anche dei ricevitori satellitari GPS, che forniscono direttamente le coordinate del punto di stazione. La quota misurata con il GPS non è però riferita al livello medio del mare ma a un'altra superficie di riferimento (*ellissoide*); per ottenere la quota sul geoide si devono applicare opportune correzioni. La misura della quota dell'Everest con i due metodi (classico e GPS) ha permesso di calcolare questa correzione. Contemporaneamente altri tre strumenti dello stesso tipo funzionavano nelle due valli di cui si conoscono le quote sul livello medio del mare. Nella parte nepalese il punto in valle è collegato anche a una stazione del Doris, il sistema satellitare francese in grado di fornire le coordinate geografiche con la precisione di qualche decimetro.

Involucri terrestri e zolle vaganti

Giovanni Battista Carulli, Istituto di Geologia e Paleontologia, Università di Trieste



Sezione degli involucri esterni della Terra.

Tutti i libri di testo mostrano la Terra formata da tre grandi sfere concentriche. Da dove viene l'idea che la Terra dentro sia fatta proprio così?

Il modello della struttura dell'interno terrestre risale al geologo del secolo scorso E. Suess, che, a partire dallo studio delle meteoriti, aveva immaginato la Terra composta da tre involucri: *Nife*, *Sima* e *Sial*. Con questi nomi Suess non si riferiva a entità mitologiche, ma solo ai simboli degli elementi chimici caratteristici, secondo la sua ipotesi, dei tre involucri (che sono poi stati chiamati, rispettivamente, nucleo, mantello e *crosta*). L'idea che il nucleo sia composto di leghe di nichel e ferro (Nife) deriva dal fatto che questi composti — principali costituenti delle meteoriti — sono decisamente rari sulla superficie terrestre. Ci doveva essere quindi un luogo dove il ferro e il nichel si erano andati a «nascondere». E, con ogni probabilità, dato anche il peso di questi elementi, doveva trattarsi del centro della Terra. C'era poi anche l'esperienza di ciò che accade negli altoforni. Difatti, se fondiamo i minerali che provengono da una miniera di ferro, il ferro precipita, mentre in superficie viene a galla quella che gli operai siderurgici chiamavano la «loppa», che è un miscuglio essenzialmente, guarda caso, silico-alluminifero (Sial). Un'altra considerazione a favore dell'ipotesi di strati di materia sempre più pesante man mano che si va verso il fondo è venuta dal calcolo della massa della Terra che, dopo opportuni calcoli, dava una densità media circa doppia di quella delle rocce della crosta.

Esistono altre prove a conferma di questo modello?

Certo, vengono soprattutto dalla sismica. Si è visto che le onde elastiche all'interno della Terra non si propagano come in un mezzo omogeneo, ma subiscono riflessioni, rifrazioni e anche estinzioni, rivelando la presenza di moltissime *superfici di discontinuità*, che separano mezzi con caratteristiche diverse. Le più grandi di queste superfici di discontinuità — la Moho, che varia da 5 a 70 km di profondità, e la Gutemberg, a 2870 km — separano rispettivamente la crosta dal mantello e il mantello dal nucleo.

Gli involucri galleggerebbero quindi uno sull'altro?

Quando diciamo «galleggiamento», ci viene in mente un tappo di sughero che galleggia sull'acqua; nel caso della Terra è la stessa cosa, in quanto effettivamente le rocce più leggere galleggiano su quelle più pesanti. E la crosta, così sottile e leggera, non solo galleggia sul mantello, ma c'è la possibilità che si spacchi in grandi placche (o zolle) che si muovono, che cioè, secondo l'ipotesi di Alfred Wegener, vanno alla *deriva*. Il modello — quasi universalmente accettato — della tettonica a zolle vede queste grandi placche allontanarsi, traslarsi e anche scontrarsi l'una con l'altra. E in coincidenza di uno scontro, se c'è in mezzo del materiale plastico, questo viene strizzato, corrugato e poi lentamente emerge. Oppure una placca si insinua sotto l'altra e va a raggiungere il mantello dove fonde.

Con che velocità avvengono queste trasformazioni?

Sappiamo, per esempio, che l'Oceano Atlantico si sta inesorabilmente aprendo, con un movimento a forbice, a una velocità di una decina di centimetri l'anno (questo a sud, dove la spaccatura avanza più rapidamente). Oggi c'è la tendenza a considerare che le strutture geologiche si formino in tempi più brevi di quelli che si pensava una volta. Faccio un esempio. Abbiamo trovato depositi lacustri di carbonfossile datati (con il C^{14}) meno di diecimila anni che, essendosi necessariamente formati in posizione orizzontale, oggi hanno raggiunto una posizione quasi verticale. Uno studio, poi, effettuato dall'Istituto Geografico Militare, ha riguardato la velocità di innalzamento delle Alpi Carniche, una velocità che è stata calcolata di 0,1 cm/anno a Codroipo e che aumenta via via che si procede verso nord, fino ad arrivare a 1 cm/anno sul Monte Brancot. Ora 1 cm/anno per un milione di anni (una quantità di tempo relativamente piccola, per i geologi) fa 10 km! Questo non ci dice che il Brancot supererà l'Everest, mostra bene però quanto rapidi possano essere i movimenti della crosta terrestre.

Esiste un modello globale delle cause e degli effetti di questi grandi movimenti della crosta?

L'allontanamento dell'Africa dall'America meridionale, ad esempio, è abbastanza facilmente spiegabile. Dal fondo dell'oceano Atlantico esce del nuovo materiale che proviene dal mantello e forma la Dorsale Medio Atlantica, la più lunga catena della Terra (che oggi emerge con l'Islanda, ed è emersa anche con isole vulcaniche tipo Capo Verde o Sant'Elena). Questo materiale basaltico spinge le due placche l'una verso nord est e l'altra verso nord ovest. L'Africa si sta addossando all'Europa, e noi crediamo che l'innalzamento dei monti registrato in Friuli sia dovuto proprio all'Africa che preme sulla placca Adriatica.

A proposito del Friuli, che relazione c'è tra i movimenti lenti e quelli bruschi?

Lo scontro tra le placche spesso continua anche dopo la formazione delle catene montuose. L'energia si immagazzina fino che a un certo punto si produce uno strappo; l'energia si libera improvvisamente sotto forma di terremoto. In certi casi lo strappo è talmente violento che può comportare vere e proprie modificazioni del paesaggio. Anche l'innalzamento delle nostre Alpi riteniamo che non avvenga in maniera continua, ma a piccoli scatti, in seguito a spinte tettoniche.

Queste affascinanti ipotesi, come possono venire verificate?

Come per la struttura dell'interno terrestre, anche per la conoscenza della tettonica le migliori conferme vengono dalla sismica. L'analisi dei viaggi di andata e ritorno delle onde prodotte da piccole scosse artificiali (*sismica attiva*) e da grandi e piccoli terremoti naturali (*sismica passiva*) permettono di ricostruire l'andamento delle masse sotto di noi. È recentemente partito il progetto CROP (una *joint venture* tra CNR, Agip ed Enel per la conoscenza della crosta profonda della nostra penisola) che intende scendere, con metodi sismici, fino alla base della crosta. Si realizzeranno una serie di profili sismici che attraversano tutta la penisola e i mari circostanti. L'Istituto di Geologia di Trieste sta lavorando al profilo CROP dell'Italia nord orientale.

Com'è nata l'Himalaya

Giorgio Poretti

Dipartimento di Scienze Matematiche, Università di Trieste

L'Himalaya è la regione dei *guinness*. Da un punto di vista geologico e geografico, presenta infatti delle caratteristiche del tutto eccezionali: è la fascia orogenica più giovane e più alta della Terra; ha il più alto gradiente di sollevamento (circa un centimetro all'anno, nella zona di Nanga Parbat); tra il Nanga Parbat e la valle dell'Indo presenta anche il più alto dislivello: quasi 7000 metri in pochi km; contiene l'altipiano più alto del mondo (il Tibet, con un'altezza di circa 5000 metri), e anche la più alta concentrazione di ghiacciai, al di fuori della regione polare. L'Himalaya è inoltre la sorgente di alcuni dei più lunghi fiumi della Terra, come l'Hindo, lo Tsang Po-Brahmaputra, il Gange, lo Yangtze, il Mekong ecc.

Ma come si è formata questa straordinaria regione?

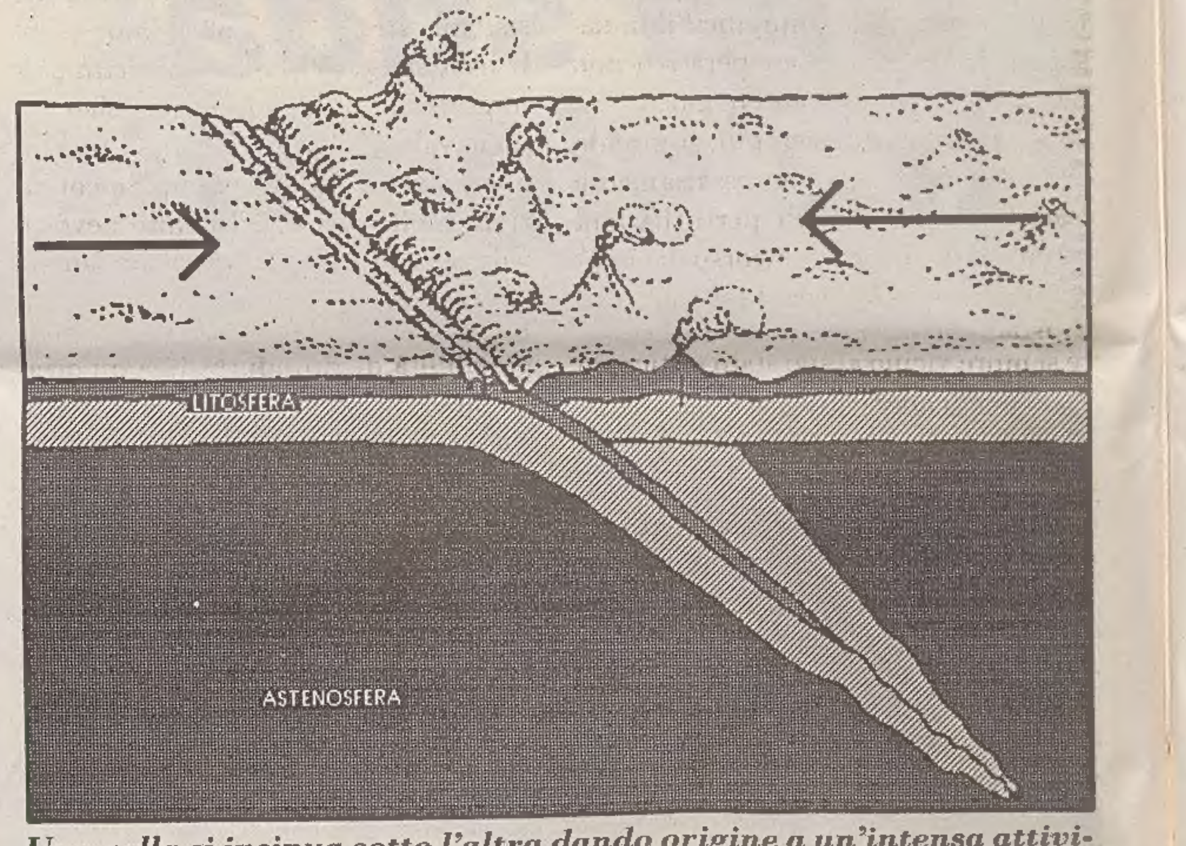
La teoria della deriva dei continenti ci dice che, in genere, le catene montuose osservabili sulla Terra hanno avuto origine dai movimenti delle grandi zolle continentali (di cui parla G. B. Carulli in questo stesso numero). Secondo questa teoria si possono distinguere due fondamentali meccanismi di formazione delle montagne. Il primo, quello che per esempio ha dato origine alle Ande, consiste nell'incunearsi (*subduzione*) di una zolla oceanica più sottile ma più densa sotto il margine di una zolla continentale più spessa ma più leggera, un processo che innesca un'attività vulcanica molto intensa. Il secondo si verifica invece in seguito alla collisione tra due zolle continentali: la crosta terrestre si piega e si increspa a fisarmonica, dando luogo ad aree di intensa deformazione. È stato il caso, tra altri, delle Alpi e dell'Himalaya.

Ma la storia dell'Himalaya può essere fatta iniziare molto prima dello scontro tra placche che l'ha prodotto. Secondo la teoria della deriva dei continenti, difatti, la storia è cominciata dallo smembramento dell'ultimo supercontinente, Pangea.

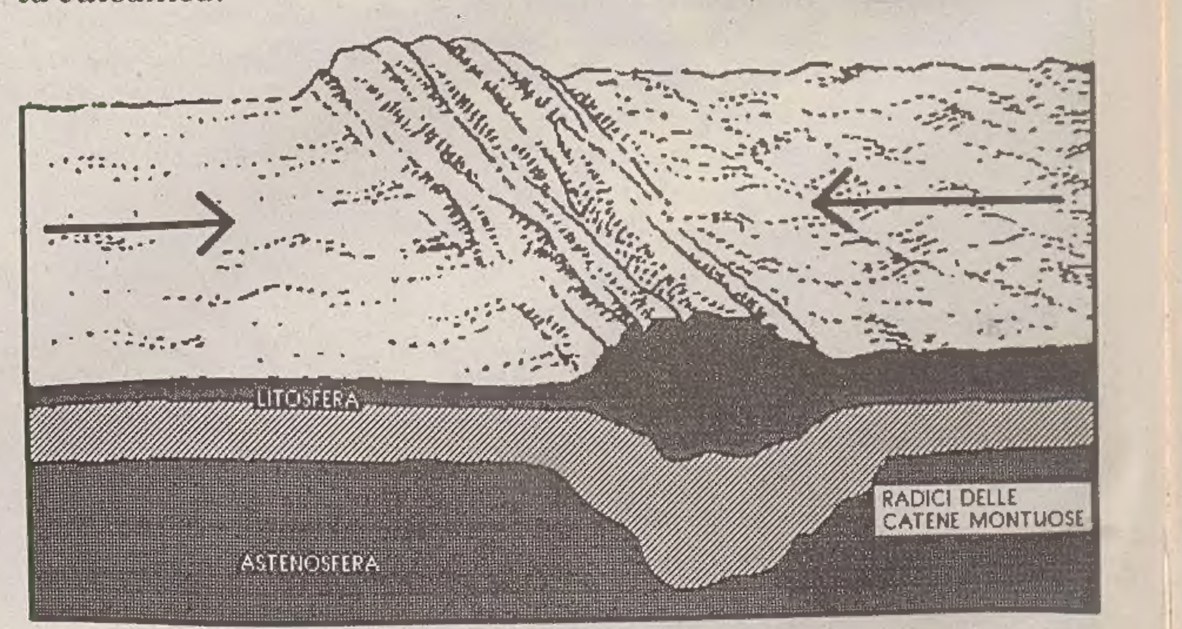
Facciamo ancora un passo indietro. Circa 420-380 milioni di anni (Ma) fa, un continente che potrebbe corrispondere al Nord America (chiamato Laurentia) si era scontrato con l'Eurasia, dando luogo alla Laurasia. Successivamente, tra i 360 e i 270 Ma fa, la Laurasia era entrata in collisione con il Gondwana e con la Siberia, per formare la Pangea; durante questa fase di assemblaggio si sono formate la catene montuose che vanno dall'Irlanda alla Scandinavia, anche gli Urali.

La Pangea rimase unita per 100 Ma, poi, circa 180 Ma fa, cominciò ad aprirsi, dando luogo alla formazione di un nuovo oceano, l'Atlantico. Durante questa fase, tra i 180 e i 140 Ma, la Laurasia si separò dal Gondwana, spingendo verso Nord quella che oggi è l'America settentrionale. In seguito, 140 Ma fa, il Gondwana si spezzò, la Laurasia si ridivise in Nord America e Eurasia. L'India, 71 Ma fa, ha iniziato il suo viaggio e da allora ha compiuto un percorso complessivo di ben 7000 km. Dalla primitiva posizione, vicino al Madagascar, l'India, prima di scontrarsi con l'Eurasia, ha subito una rotazione e uno spostamento verso Nord di circa 5000 km in 20-30 Ma. Dopo lo scontro, avvenuto circa 40 Ma fa, la velocità, da 15 cm all'anno si ridusse bruscamente a 5,2 cm all'anno. Nonostante questo rallentamento, l'accostamento dell'India con l'Eurasia è continuato fino a oggi per altri 2000 km in direzione Nord.

In questa fase si è avuto un sovrascorrimento dell'Asia sulla placca indiana che si è piegata verso il basso. La crosta continentale dell'India invece è rimasta a galla a causa della sua relativa leggerezza, e si è corrugata in varie fasi, dando origine alla catena himalayana e all'altipiano tibetano, dove, in superficie, si sono venute a formare delle profonde fratture (*faglie*). Queste faglie delimitano delle strutture tettoniche, zolle che possono muoversi anche indipendentemente le une dalle altre.



Una zolla si insinua sotto l'altra dando origine a un'intensa attività vulcanica.



Una catena di montagne si forma nello scontro tra zolle.

Questa teoria sulla formazione dell'Himalaya lascia comunque aperti ancora molti interrogativi, ai quali gli studiosi stanno cercando di rispondere con un lento e paziente lavoro di ricerca:

— che fine ha fatto tutta la massa spostata dalla spinta dell'India nel suo movimento di 2000 km verso Nord?

— qual è la velocità attuale del movimento dell'India rispetto all'Eurasia e agli altri continenti?

— il gradiente di accrescimento è lo stesso in tutta la catena dell'Himalaya o varia da zona a zona?

— in quali direzioni vanno gli spostamenti delle singole strutture tettoniche della catena?

Gli studi recenti, che hanno portato all'installazione di una rete di punti geodetici (vedi scheda accanto) situati tra la pianura indiana e l'altipiano tibetano, tendono a dare risposta ad alcune di queste domande. Le misure effettuate sui punti che compongono questa rete permetteranno, ripetute a distanza di tempo o dopo teremoti di notevole intensità, di stabilire l'entità e la direzione dei movimenti orizzontali e verticali delle strutture tettoniche. La recente misura dell'Everest costituisce un contributo a queste ricerche.

Quanto è alto quel monte?

Claudio Marchesini, Università di Udine

Il problema della quota

La posizione di un punto sulla superficie terrestre viene determinata con un sistema di coordinate: *latitudine* e *longitudine*. Questo sistema è definito su una superficie matematica che si ottiene ruotando attorno a un suo asse un'ellisse e che per questo viene chiamata ***ellissoide***.

Le altezze, invece, vengono misurate a partire da un'altra superficie chiamata ***geoide***. Sugli oceani, il geoide coincide con la superficie libera dell'acqua (tolti gli elementi di disturbo, come onde, correnti, maree); sulla terra ferma, questa superficie continua in modo da restare in ogni suo punto perpendicolare alla direzione della gravità. La forma del geoide, dipendendo dalla gravità terrestre, varia al variare della densità delle rocce sottostanti, e risulta quindi corrugata. Queste irregolarità del geoide e queste divergenze tra geoide ed ellissoide complicano enormemente la definizione di quota. C'è una quota rispetto all'ellissoide, che è misurabile solo da pochi anni con i ricevitori satellitari. E c'è una quota rispetto al geoide, che è data come altezza rispetto al livello del mare secondo la direzione della forza di gravità (determinabile con il filo a piombo).

D'altra parte, la quota calcolata rispetto all'ellissoide è un numero di difficile interpretazione per i normali usi topografici, perché non è riferita al livello del mare. La misura della differenza tra le due quote, cioè della distanza fra il geoide e l'ellissoide, costituisce uno dei compiti fondamentali della *geodesia*.

Il geoide

La misura della quota rispetto al geoide viene eseguita in modo indiretto a partire dalla misura di angoli e distanze (*livellazione trigonometrica*). Se si vuole misurare la cima di un monte, si sceglie un punto a valle di quota nota e si misurano la *distanza* tra la cima e il punto a valle e l'*angolo zenitale*. L'angolo zenitale è l'angolo fra la direzione della verticale (zenit) e la linea che congiunge i due punti. La misura degli angoli è affetta da due errori fondamentali: la *deviazione della verticale* e l'effetto delle variazioni di densità dell'aria. La deviazione della verticale dovuta alle differenti deviazioni delle masse all'interno della Terra costituisce un errore sistematico che si cerca di correggere mediante misure astronomiche e gravimetriche. Per misurare l'angolo zenitale si utilizza uno strumento chiamato *teodolite*. La distanza tra i due punti si misura invece con il *distanziometro*. Si tratta di uno strumento che emette un segnale elettromagnetico (di solito luce rossa o infrarossa). Sul punto da misurare è stato fissato un prisma retroriflettente che rimanda indietro il segnale. Il distanziometro è in grado di contare il numero di lunghezze d'onda contenute nel percorso di andata e ritorno del segnale. Moltiplicando tale numero per la lunghezza d'onda, si ottiene alla fine la distanza. Purtroppo, la lunghezza d'onda del segnale luminoso varia al variare della densità dell'aria. Per potere apportare le dovute correzioni, occorre quindi misurare molto accuratamente la temperatura e la pressione dell'aria.

Un gruppo di ricercatori al lavoro con il teodolite.

I prismi riflettenti e il GPS sulla cima dell'Everest.

L'ellissoide

La misura della quota rispetto all'ellissoide si effettua con il *metodo satellitare*. Questo metodo si basa sul GPS (Global Positioning System), che consiste in un insieme di satelliti artificiali che emettono onde elettromagnetiche e in un ricevitore che è in grado di calcolare la distanza fra la sua posizione e quella dei satelliti. Dato che la posizione dei satelliti è nota con un alto grado di precisione si possono facilmente calcolare la latitudine, la longitudine e la quota del ricevitore rispetto all'ellissoide. In queste misure di coordinate con ricevitori satellitari occorre distinguere tra la precisione assoluta e quella relativa. La *precisione assoluta* che si ottiene tenendo conto di un solo ricevitore è dell'ordine delle decine di metri. Se invece si tiene conto dei dati provenienti *contemporaneamente* da più ricevitori distanti tra loro anche decine di km, si possono determinare le distanze tra i punti di stazione dei ricevitori con errori di qualche mm/km (*precisione relativa*).

Il metodo GPS è utilizzato sia a scopi cartografici sia, soprattutto, nella sorveglianza di frane o nello studio delle placche tettoniche, per misurare le posizioni relative di punti.

Il ritmo dei terremoti

Giovanni Paladin, Dipartimento di Fisica, Università dell'Aquila

Il problema della predicibilità dei terremoti è un affascinante tema di discussione, su cui si cimentano diverse scuole di pensiero e ricercatori di aree fra loro distanti come la geofisica e la fisica teorica.

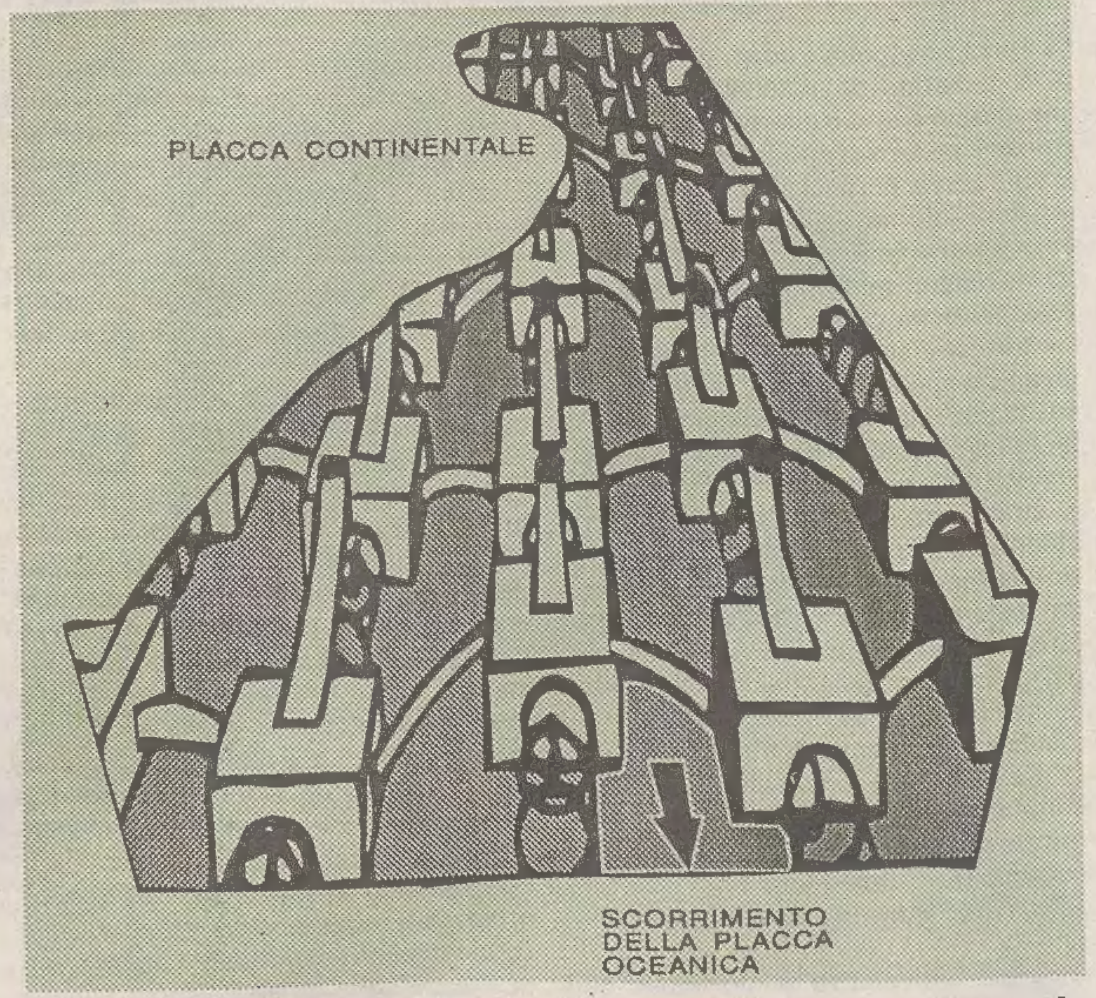
In fisica, una teoria è predittiva quando è in grado di affermare che, dati certi presupposti, seguono determinate conseguenze. Non sempre, però, è dato sapere quand'è che effettivamente si realizzeranno questi presupposti. Indagare quali siano i limiti della predicibilità è quindi essenziale per poter agire razionalmente nel mondo che ci circonda. Decidere quali fenomeni siano predicibili e su quali scale di tempo lo siano si impone come uno dei problemi scientifici fondamentali.

Nel caso dei terremoti, ci si è resi conto che la ricerca nel campo sismico — imponente per numero di scienziati e impegno finanziario — si trova in un vicolo cieco, perché la linea «tradizionale», concentrata sulla predizione dei grandi terremoti, permette di ottenere solo scarsi risultati. Di qui l'attenzione e la risonanza che hanno approcci alternativi proposti nell'ambito della nuova fisica dei *sistemi complessi*, in cui la complessità e l'apparentemente irriducibile impredicibilità nascono da un effetto cooperativo non banale delle componenti in gioco.

Nei terremoti, ad esempio, il grande evento sismico non è necessariamente causato da eccezionali perturbazioni esterne o da un raro concorso di circostanze sfortunate. Anzi l'ipotesi è che il sistema si organizzi in modo da essere sempre vicino al suo stato critico, lo stato in cui anche una minima perturbazione può essere sufficiente a innescare l'evento catastrofico. Sembra, infatti, che le piccole scosse e i grandi terremoti siano generati da un medesimo meccanismo. Questo tipo di comportamento (reazioni a catena in sistemi estesi) è stato chiamato — dal fisico danese Per Bak — *criticità autorganizzata*. L'esempio classico sono le valanghe: il passaggio di un singolo sciatore può provocare, in condizioni molto simili del manto nevoso, valanghe di diversa grandezza, anche enormi!

Da queste considerazioni segue l'impossibilità di riprodurre il comportamento dei grandi sismi come semplice somma di tanti piccoli sottosistemi interagenti. In ognuno dei sottosistemi la risposta è proporzionale alla perturbazione, ma, una volta «acceso» l'accoppiamento fra diversi sottosistemi, questo non è più vero. Il fallimento dei metodi tradizionali deriva proprio dall'aver considerato un troppo semplice meccanismo di causa-effetto. L'idea base per comprendere gli aspetti qualitativi dei terremoti consiste nel rinunciare a descrivere le caratteristiche nei dettagli, focalizzando l'analisi su modelli più semplici che presentino gli aspetti fondamentali della criticità autorganizzata. Il modello standard è stato proposto dai due geofisici Burridge e Knopoff nel 1967. In pratica si considerano molti blocchi rigidi su un piano scabro collegati fra loro da molle. I blocchi sono poi trascinati da una faglia che si muove a velocità molto lenta e costante. Ovviamente l'insieme dei blocchi rappresenta la zolla elastica e il piano scabro quella rigida; i blocchi e il piano sono in mutuo movimento. L'attrito statico tiene incollati i blocchi sul piano scabro, finché la forza di trascinamento non supera una certa soglia in uno dei blocchi. Il blocco scivola trascinando uno o più blocchi vicini e si genera così un processo a cascata. A causa dell'attrito i blocchi si arrestano nuovamente e la faglia si trova in diversa posizione di equilibrio fino al prossimo scorrimento. Nel modello l'energia rilasciata da un evento sismico (e quindi la magnitudo del terremoto) è collegata al numero di blocchi coinvolti nel processo di cascata. Il meccanismo di adesione e scorrimento (in inglese: *stick-slip*) è una mimica grossolana ma qualitativamente corretta della tettonica a zolle.

Recenti studi hanno messo in luce che il meccanismo dinamico che genera la criticità autorganizzata nel modello di Burridge e Knopoff viene dato da una evoluzione fortemente irregolare, caotica in modo assai intermittente. Se questo fosse vero anche in situazioni geofisiche reali le conseguenze sarebbero drammatiche. Infatti la forte intermittenza della caoticità implica che i tempi su cui ha senso fare delle previsioni dalla conoscenza dello stato iniziale del sistema debbano fluttuare così violentemente da impedire la definizione di una scala di tempo caratteristica per la predicibilità sismica, a differenza di quanto succede nella meteorologia dove esiste un tempo caratteristico dell'ordine della settimana. Per stabilire i limiti in cui possono operare i geofisici, è della massima importanza comprendere se questo risultato, sebbene negativo, sia applicabile in ambito più esteso.



Schema del modello a blocchi della criticità autorganizzata: la placca oceanica è rappresentata da un piano che si muove con una certa velocità, trascinando con sé i blocchi attaccati con delle molle.

Attenti alle scosse

Dario Slejko
ricercatore dell'Osservatorio Geofisico Sperimentale di Trieste

Poiché l'Italia è una regione a sismicità elevata, i governi che si sono succeduti hanno dovuto affrontare il problema di proteggere persone e cose dai terremoti. Le prime misure legislative vennero prese dal governo borbonico a seguito dei terremoti che in Calabria nel 1783 causarono gravi danni e più di 30 000 morti, ma solo a seguito del terremoto che distrusse Reggio Calabria e Messina il 28 dicembre 1908, causando 80 000 vittime, fu elaborata la prima classificazione sismica e cioè l'elenco dei comuni a rischio dove dovevano essere applicate particolari norme costruttive. Questa lista conteneva solo i comuni della Sicilia e della Calabria gravemente colpiti dal terremoto, e veniva modificata dopo ogni evento sismico semplicemente aggiungendovi i nuovi comuni danneggiati. Nel 1974 fu promulgata la nuova normativa sismica nazionale contenente anche i criteri di costruzione antisismica.

Gli studi di carattere sismologico e geologico a seguito del terremoto del 1976 in Friuli e in quello del 1980 in Irpinia, svolti nell'ambito del Progetto Finalizzato Geodinamica del CNR, portarono a un sostanziale aumento delle conoscenze sulla sismicità del territorio nazionale e permisero la formulazione di una proposta di classificazione sismica presentata dal CNR al governo e tradotta in una serie di decreti da parte del Ministero dei Lavori Pubblici tra il 1980 e il 1984, che costituiscono l'attuale classificazione sismica italiana. Questa proposta del CNR era, per la prima volta in Italia, basata su indagini di tipo probabilistico. Da allora il Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (GNDT) del CNR ha proseguito nell'attività di analisi della sismicità italiana, con particolare attenzione allo studio della pericolosità sismica.

Per pericolosità sismica si intende la probabilità di superare — in un fissato periodo di tempo — una soglia prescelta di vibrazione (in termini o di intensità macrosismica, espressa in gradi della scala Mercalli, o di accelerazione orizzontale del terreno). Varie sono le metodologie di calcolo della pericolosità sismica, e possono essere di tipo deterministico o statistico-probabilistico; la scelta della più consona deriva dalle conoscenze sismiche e geologiche della regione studiata. L'approccio deterministico presuppone che il fenomeno sia conosciuto dal punto di vista fisico e pertanto sia possibile costruire un modello matematico. Nell'approccio probabilistico, invece, viene individuata la distribuzione della sismicità regionale utilizzando i terremoti avvenuti nel passato e da questa viene calcolata la probabilità che in un certo posto sia avvertito un terremoto di una certa intensità in un determinato periodo di tempo. L'approccio probabilistico può poi essere applicato seguendo diverse metodologie che possono essere raggruppate in due tipi fondamentali: quelle che partono dalla sismicità delle strutture tettoniche conosciute per costruire la distribuzione delle vibrazioni nel luogo studiato, e quelle che derivano invece la distribuzione direttamente dalle vibrazioni osservate nel passato.

Nel primo caso è necessario conoscere l'ubicazione delle faglie che producono terremoti, il numero di terremoti delle diverse classi di magnitudo che si verificano mediamente in un periodo fissato di tempo e le caratteristiche della propagazione della vibrazione. L'individuazione delle strutture tettoniche è un'operazione molto complessa e si avvale di tutte le informazioni disponibili di carattere geologico e geofisico.

Nello studio della sismicità riveste una grande importanza la conoscenza dei terremoti più forti avvenuti nel passato. Si è infatti notato empiricamente che la sismicità si esprime sia a livello locale che globale con terremoti che seguono la legge di Gutemberg-Richter. Secondo questa legge, per ogni terremoto forte che si verifica in una certa zona ci sono molti terremoti medi e moltissimi terremoti deboli; pertanto la sismicità nel futuro ripeterà mediamente quella del passato e dalla distribuzione dei terremoti avvenuti è possibile calcolare il terremoto più forte che probabilmente avverrà nei prossimi anni.

Il progetto GNDT per la stima della pericolosità sismica del territorio nazionale, attualmente in fase di realizzazione, prevede di seguire tutte e due le metodologie probabilistiche sopra citate, completate da analisi di tipo deterministico. Dai risultati che si otterranno il CNR formulerà la nuova proposta di classificazione del territorio nazionale.

Scricchiolii della crosta terrestre

una legge universale

È stato osservato che la statistica dei terremoti obbedisce alle stesse leggi empiriche un po' dappertutto. In particolare, il numero dei terremoti *N* con un rilascio di energia superiore a *E* è grosso modo inversamente proporzionale a *E*. Una tale *legge di scala* (che non varia cioè con il variare degli ordini di grandezza degli eventi studiati) indica che per dieci grandi terremoti, diciamo di energia 1000 in unità arbitrarie, ve ne sono mille di energia 10 e uno di energia 10 000. Più precisamente, non si ha esattamente una legge di proporzionalità inversa, ma la legge di Gutemberg-Richter $N \sim 1/E^b$ dove l'esponente *b*, compreso tra 0,5 e 1, sembra essere un indice universale, ovvero indipendente dalla zona del pianeta, dalla profondità dell'ipocentro del terremoto o da altre caratteristiche. Lo si è ritrovato addirittura analizzando le vibrazioni dei cardini di una porta.

Questa universalità suggerisce che i dettagli sono inessenziali per descrivere la statistica dei terremoti e quindi si possono usare modelli molto semplificati come quelli descritti nell'articolo di Paladin in questa pagina.

SCIVOLANDO SUL *FLYSCH*

Livio Sirovich
ricercatore dell'Osservatorio Geofisico Sperimentale di Trieste

Mentre scrivo queste righe, il giardino della mia casa, non lontano dalla prima erta del tram di Opicina, sta scendendo verso il mare alla velocità di qualche millimetro all'anno. Quando l'ingegner Eugenio Geiringer, attraverso i suoi agganci amicali e massonici, convise l'Amministrazione municipale triestina — per carità! sono storie morte, di un secolo fa — a spostare la linea della funicolare in modo che passasse accanto al suo romantico «Castelletto», non poteva immaginare che, nel corso di un secolo, le rotaie sarebbero inesorabilmente scivolate verso piazza Oberdan di alcuni centimetri.

Mettiamo che un solitario lettore dia un'occhiata distratta a questo articoletto, stando comodamente in poltrona nel suo troppo grande appartamento del Borgo Teresiano, onusto di gloria e di polvere. Egli non si accorgerà che i blocchi di arenaria e i tronchi di rovere — di Slavonia —, su cui furono fondati (e ancora, bene o male, si reggono) gli edifici del commercio triestino, stanno lentamente sprofondando nella melma di antiche saline romane, venete ecc. Se incredulo, si affaccerà alla finestra per controllare la situazione, non si aspetti di assistere a particolari cataclismi; le vie gli sembreranno ferme. Eppure, nonostante tutto il male che si dice del «cerbero austriaco» che avrebbe oppresso Trieste, faccia almeno credito agli ingegneri del *Kaiser und König* di aver saputo costruire strade piane e di non averle volute a schiena d'asino, come appaiono ora, per boicottare gli italianissimi traffici. La forma asinina è colpa della consolidazione sotto carico dei limi e delle argille del sottosuolo: hanno ceduto di alcune decine di centimetri solo in corrispondenza degli edifici. Peggiore è la situazione dei terreni a valle della strada costiera triestina. Là, i giardini hanno una fretta barbarica di andarsi a bagnare nelle acque dell'Adria; tempo un paio di millenni e saranno quasi tutti a mollo. Credetemi sulla parola: anche i contadini sloveni conoscevano l'uso del filo a piombo; muretti spanciati, lastricati sconnessi, alberi inclinati provano la loro calata verso il mare (intendo: dei muretti ecc.).

Spostamenti di questo tipo sono del tutto normali nella formazione geologica internazionalmente chiamata *Flysch*. (Ancora un termine Imperial-regio; la sua versione locale è, anzi *xe*, *crostel*.) A tratti, il Flysch è infatti composto prevalentemente da limi e da argille legati da poco carbonato di calcio. Fino alla profondità di alcuni metri, il crostel è chimicamente e fisicamente alterato dagli agenti atmosferici. In queste condizioni, esso non riesce a opporre sufficiente resistenza alla forza di gravità che inesorabilmente lo tira verso il basso, in un movimento viscoso relativamente più veloce in superficie e meno in profondità. Fu per questo motivo che i geologi austro-ungarici consigliarono a Massimiliano di farsi costruire la sua sfarzosa villa-castello di Miramare non sul Flysch, bensì su uno dei grandi faraglioni calcarei che vi sono disseminati. Ovviamente, si guardarono bene dall'andare a dire a Carlotta (era un po' neurolabile; ne avrebbe fatto una malattia) che quegli enormi blocchi di calcare avevano tutta l'aria di essersi calati recentemente a valle dal ciglione della Carniola. Recentemente in senso geologico: trasportati dal Flysch che «colava» lentissimamente dal nascente pendio calcareo man mano che il Carso veniva sollevato dalle spinte orogenetiche degli ultimi milioni di anni. Se la pellicola superficiale dei pendii flyschoidi di Trieste, del Friuli orientale, del Collio Goriziano e del Muggesano sono in lento movimento verso il basso, è altresì vero che gli interi corpi collinari e montuosi sono in lento innalzamento. Stiamo infatti tuttora vivendo la «coda» dell'Orogenesi Alpina, iniziatasi alcune decine di milioni di anni fa. La velocità di questo innalzamento non è nota con esattezza, ma si ritiene che sia dell'ordine dei millimetri, forse frazioni di millimetri, per anno. Sembra poco, ma in un milione di anni fanno un paio di chilometri. Viviamo insomma in un paesaggio in continuo movimento, senza punti fissi cui ancorare le nostre certezze. Ne ha approfittato una nuova disciplina geologica — la «neotettonica» — che indaga per l'appunto i movimenti relativi avvenuti nelle ultime centinaia e decine di migliaia di anni nella crosta terrestre. Per quanto riguarda la zona di Trieste, appartenente — dal punto di vista geologico, beninteso — ai Balcani, le interpretazioni geodinamiche concordano su alcuni punti e divergono su altri. Studiosi slavi attribuiscono grande importanza alla presenza di due «lineamenti»: il primo potrebbe individuare una «spaccatura» che andrebbe grossomodo da Umago a Lubiana, passando per la Val Rosandra; il secondo, più importante, potrebbe avere un decorso iniziale coincidente con la costa orientale dell'Istria per proseguire poi verso Zagabria e l'Ungheria. Il condizionale è d'obbligo, non solo perché tra geologi croati, serbi e macedoni non corre buon sangue dagli anni sessanta (si sa: la Scienza precorre i tempi), ma anche perché non è chiaro se si tratti di faglie rilevate sul terreno o, più probabilmente, presunte. Lungo tali spaccature, nel corso degli ultimi milioni di anni, l'attuale Istria avrebbe potuto spostarsi verso sud-est venendo a costituire l'unica grande penisola della costa orientale dell'Adriatico. Esiste viceversa un discreto accordo tra gli studiosi a proposito della struttura tettonica (pieghe e faglie) della Costiera triestina. Una prospezione sismica eseguita negli anni sessanta ha infatti rivelato che la serie calcarea mesozoica, affiorante nel Carso triestino-monfalconese, al largo della Costiera si trova a circa un chilometro di profondità, sepolta dal Flysch e dai sedimenti marini recenti. La costa rocciosa è insomma impostata su una specie di «scalino» formatosi perché lungo due faglie parallele, di cui una in mare, in tempi geologici si è prodotto uno spostamento relativo verticale tra i due blocchi a contatto. Questo spostamento è tuttora in corso? Direi di no, e vi spiego perché.

Sempre negli anni sessanta, l'Osservatorio Geofisico Sperimentale tracciò una mappa (dedotta da indagini geofisiche) raffigurante la superficie di separazione tra il substrato flyschoide del Golfo di Trieste e i sedimenti «fangosi» deposti dal mare in epoca recente. Orbene, questa mappa suggerisce che il Golfo di Trieste, prima di venire invaso dalle acque, presentava un paesaggio dolcemente ondulato, percorso da piccole valli costituenti il diretto prolungamento delle incisioni attuali (Ospo-Rosandra e il torrente convogliato sotto le vie Battisti-Carducci). La morfologia di questo paesaggio sommerso non appare per nulla condizionata dalla presenza della faglia al largo della Costiera e quindi non può che essersi formata dopo che tutto il blocco a sud-ovest si era abbassato di oltre un chilometro rispetto all'attuale altopiano carsico.

Osservatorio Geofisico Sperimentale

Carlo Morelli
Dipartimento di Ingegneria Navale, del Mare e per l'Ambiente, Università di Trieste

L'Osservatorio Geofisico Sperimentale di Trieste (OGS) trae le sue lontane origini dall'Osservatorio Meteorologico fondato a Triete nel 1841 ed è per questo una delle istituzioni scientifiche italiane con le più antiche tradizioni nel campo della geofisica applicata. Nel 1958 l'OGS ottiene il riconoscimento giuridico con una legge che ne definisce i compiti e le discipline di ricerca. Da allora l'OGS si è sviluppato in modo prodigioso e in pochi anni ha conquistato una posizione di primo piano in campo nazionale e internazionale. Malgrado il contributo dello Stato non coprisse all'inizio che un ventesimo del necessario, l'OGS realizzò con la ricerca per conto terzi utili sufficienti per dotarsi di apparecchiature di avanguardia e per autofinanziarsi anche parte della ricerca scientifica.

La nave Explora dell'OGS, specializzata nell'acquisizione di dati sismici.

Attualmente l'OGS svolge ricerche nel campo della sismologia, della oceanografia, della fisica della Terra, della evoluzione geologica della deriva dei continenti, dei problemi del territorio con un occhio particolarmente attento agli aspetti applicativi, quali l'individuazione di fonti energetiche, l'impatto ambientale, la protezione sismica.

Lo studio del campo gravimetrico terrestre (cioè del valore dell'accelerazione di gravità) e delle sue anomalie è stato uno dei primi progetti di ricerca: iniziato a livello locale (caverne sotterranee, corso del Timavo,...) si è esteso a livello regionale e nazionale in collaborazione con altri istituti scientifici ed è sfociato nella pubblicazione della prima carta gravimetrica d'Italia. Data la configurazione geografica italiana, è nata poi la necessità di studiare anche i mari circostanti: il rilievo gravimetrico dei mari italiani è stato effettuato con navi oceanografiche del CNR tra il 1964 e il 1972.

L'interpretazione quantitativa delle anomalie gravimetriche è stata poi associata a un esteso progetto di sismica attraverso prospezioni a riflessione e rifrazione che registrano le onde sismiche riflesse e rifratte dalla crosta terrestre.

Dal 1988 tutte queste ricerche sono state effettuate dalla nave Explora, ideata, progettata e costruita appositamente per l'acquisizione di dati sismici a riflessione unitamente a dati di gravità e di magnetismo. L'OGS con la nave Explora ha partecipato al progetto Antartide promosso dal Ministero della Ricerca Scientifica e Tecnologica e coordinato dall'ENEA; l'OGS aveva l'incarico di condurre una serie di campagne di ricerche geofisiche atte a ricostruire la storia geologica del continente antartico.

Le ricerche condotte nel mare Mediterraneo hanno prodotto un'ampia messe di dati che ha consentito alla Commissione Oceanografica Intergovernamentale dell'UNESCO di pubblicare (sotto la guida dell'autore) una serie di carte (batimetrica, gravimetrica, magnetometrica, sismica,...) che saranno il modello per analoghe iniziative cartografiche in altri mari e oceani.

L'OGS è dunque un esempio di come dalla ricerca scientifica possa germogliare una vasta serie di ricerche industriali e applicate che, oltre a offrire continui aggiornamenti con la realtà, possono anche fornire i mezzi di sussistenza della ricerca stessa.

I pendoli nella grotta

Maria Zadro, Istituto di Geodesia e Geofisica dell'Università di Trieste

La Terra è soggetta a continue deformazioni generate da potenti meccanismi che agiscono al suo interno. Questi meccanismi però ci sono perlopiù sconosciuti, come pure ci è sconosciuta la struttura interna della Terra, perché le uniche osservazioni possibili riguardano movimenti della superficie, e le modificazioni della geometria della superficie terrestre sono avvenute nell'arco di un ampio spettro di tempi, che, dall'epoca attuale, risale a ere geologiche remote. Perciò, ricostruire le ragioni dei movimenti della crosta significa fare illazioni su ciò che è avvenuto in tempi e in luoghi lontanissimi dalla nostra portata.

Un caso eccezionale è costituito, invece, dalle *maree terrestri*, perché le cause di queste deformazioni non si perdono negli abissi ipogei, né risalgono all'alba dei tempi, ma si ritrovano nel cielo momento per momento. Si tratta difatti delle deformazioni provocate nell'intero corpo terrestre dalle forze di attrazione gravitazionale e centrifughe agenti nel sistema Terra-Sole-Luna, le stesse forze che provocano le ben note maree marine.

Osservazioni relative ai movimenti del terreno legati a fenomeni mareali o sismici risalgono all'antichità. Circa 2000 anni fa, in quasi perfetta simultaneità, il cinese Chang Heng e il latino Plinio il Vecchio studiavano i movimenti della superficie terrestre. Chang Heng inventò un ingegnosissimo sismometro; Plinio il Vecchio studiava i movimenti tellurici nella zona di Pompei, e — cosa ancora estremamente attuale — nelle variazioni di livello delle acque dei pozzi cercava di individuare fenomeni precursori dei terremoti. Scoprì anche le correlazioni con il moto degli astri, compiendo la prima osservazione di maree terrestri.

Nonostante l'interesse di queste ricerche, fino alla metà di questo secolo, soprattutto per carenze tecnologiche, le stazioni installate per la misura delle maree terrestri furono a dir poco sporadiche. Soltanto nel 1957, in occasione dell'Anno Geofisico Internazionale, ci si decise a installare una rete di stazioni a livello mondiale. E fu così che nacque la stazione della Grotta Gigante, dotata di una strumentazione unica al mondo, ideata, progettata e realizzata con fantasia e creatività da Antonio Marussi, l'illustre maestro triestino della geodesia che è scomparso qualche anno fa.

Lo strumento è costituito da due pendoli orizzontali direttamente attaccati alla roccia che, sfruttando tutti i cento metri di altezza della grotta, misurano anche minime inclinazioni della verticale (la verticale è deviata dalle forze di marea e dalle deformazioni da queste indotte nel corpo terrestre).

Ma nella scienza succede spesso che una ricerca produca inaspettati successi su obiettivi non programmati. Così è stato con la stazione della Grotta Gigante che, nata per lo studio delle maree terrestri, ha fornito anche dati imprevisti su effetti sismici, presismici e sulle lente deformazioni tettoniche della placca adriatica. Per la loro ineguagliata lunghezza, i pendoli della Grotta Gigante riescono a rilevare vibrazioni di bassissima frequenza, che sfuggono ai normali sismografi.

I pendoli sistemati nella Grotta Gigante misurano le oscillazioni della crosta terrestre.

Il primo eccezionale risultato fu la registrazione — tuttora unica al mondo — di oscillazioni libere della Terra provocate da un potente terremoto scatenatosi in Cile nel 1961. La Terra, come un qualsiasi corpo elastico, entra in oscillazione per effetto di un potente impulso: il fatto era ben noto teoricamente e alcuni tipi di oscillazioni erano già stati rilevati, ma con i pendoli della Grotta Gigante si è riusciti a registrare anche le oscillazioni di tipo torsionale (quelle cioè che fanno scorrere i vari strati terrestri come gusci uno sull'altro), con una precisione che ancora oggi non è raggiungibile neanche dai sismografi più sofisticati. Dallo studio di questi dati si è riusciti a capire meglio la struttura interna del nostro pianeta.

Un ulteriore notevole contributo dato dai pendoli della Grotta Gigante riguarda il terremoto del Friuli del 1976; alcuni anni prima del terremoto i pendoli avevano cominciato a registrare delle ampie perturbazioni che immediatamente dopo il sisma si ridussero drasticamente, come una tensione improvvisamente scaricata. Questo ha suggerito l'idea di utilizzare i pendoli anche per la previsione dei terremoti. Gli effetti registrati con i pendoli, uniti alle deformazioni del lembo nord-orientale della placca adriatica (osservate già per un trentennio e ora collegabili con i risultati ottenuti da altri strumenti sistemati nell'area sismica del Friuli dopo il terremoto del 1976) sono stati e sono tuttora oggetto di attento studio sia a scopo previsionale dei terremoti limitrofi sia per l'individuazione delle caratteristiche geodinamiche dell'intera area.

NEWS DALL'IMMAGINARIO

Da pochi mesi il Laboratorio dell'Immaginario Scientifico (LIS) occupa anche il secondo piano del Centro Congressi della Fiera. In questo nuovo spazio è stata realizzata un'area destinata alle mostre temporanee, un'area per le attività didattiche e i nuovi uffici.

NUOVI LABORATORI DI SPERIMENTAZIONE DIDATTICA. Inaugurati in settembre sono già operativi: *Oltre lo specchio* (mostra/laboratorio di geometria), l'*Esperimentoteca* (spazio attrezzato per la sperimentazione nella didattica delle scienze) e il *Laboratorio di microscopia* (per introdurre anche i più piccoli ai temi generali della biologia e alle principali tecniche di microscopia). Per informazioni e prenotazioni tel. 040/397305.

PLANETARIO GONFIABILE. Disponibile da gennaio potrà ospitare fino a 25 persone più l'animatore. Per le scuole della Regione sarà attivo un «servizio a domicilio». Il planetario è facilmente trasportabile e non richiede troppo spazio per essere montato.

BIBLIOTECA SCIENTIFICA PER RAGAZZI. Continua a essere attivo il servizio di animazione didattica. La Biblioteca oltre alle consuete visite per appuntamento (tel. 040/397305) è aperta alla libera consultazione lunedì e mercoledì pomeriggio dalle 16 alle 19.

LA SCIENZA DA SFOGLIARE. Sono disponibili i primi due numeri della minirivista trimestrale di informazione libraria a cura della Biblioteca e dell'Editoriale Scienza di Trieste. *La scienza da sfogliare* è diffuso gratuitamente tra le scuole di due regioni pilota (Friuli-Venezia Giulia ed Emilia Romagna).

LE CONFERENZE. *Dal mondo della precisione all'universo della complessità* è il tema di una serie di incontri che si articoleranno in più sezioni fino a maggio. La prima parte dedicata al sistema Terra si è svolta lo scorso novembre. A febbraio continuerà sui sistemi biologici.

ECSITE. Il LIS è attualmente la sola organizzazione italiana a far parte del gruppo di 9 musei scientifici europei che compongono il board dell'ECSITE. Questo consorzio di musei scientifici è sorto recentemente per stimolare una più larga diffusione della cultura scientifica su scala europea attraverso la promozione di nuove forme di cooperazione e interscambio di iniziative.

L'avventura della piramide

(Continua dalla prima pagina)

grosso problema, ma senza laboratorio non potevamo stare. Ci installammo nella saletta da pranzo e la adattammo a laboratorio (fuori dalle ore dei pasti).

L'altra brutta notizia ci arrivò per radio. A Marchesini avevano diagnosticato mal di montagna ed era tornato a Kathmandu. Di tutto il nostro gruppo Marchesini era quello che conosceva meglio gli strumenti e le loro prestazioni. Insieme avevamo progettato e discusso ogni particolare. La sua pignoleria, anche se talvolta pedantesca, era sempre una garanzia che tutto fosse fatto nel migliore dei modi.

La sera del 27, Agostino da Polenza, il capo della spedizione, ci comunicava che l'indomani, alle 3 del mattino gli scalatori sarebbero partiti dal Colle Sud e avrebbero affrontato l'ultimo tratto della salita per arrivare in cima verso mezzogiorno. Sarebbero partiti in 8: tre italiani, due francesi e tre sherpa, che avrebbero portato in cima le attrezzature scientifiche.

Ma anche quella notte le cose andarono diversamente dal previsto. I due sherpa che dovevano portare il treppiede si attardarono nei preparativi e perciò partì prima un gruppo di cinque persone con il GPS. Con gli altri due rimase Benoit Chamoux, senza dubbio il più forte scalatore del gruppo, il quale aveva l'incarico di installare il treppiede. Pensando di raggiungere i primi, tenne con sé il walkie-talkie. Col passare del tempo, però, il ritardo dei tre inseguitori divenne incolmabile. Il primo gruppo arrivò in vetta, ma non potevano comunicare nè ricevere le istruzioni per l'avviamento dello strumento. I cinesi vedevano qualcuno sulla vetta e chiedevano istruzioni, ma noi non sapevamo che cosa fare. Un'eventualità imprevista. Ad un certo punto abbiamo acceso i GPS, sperando che lassù avessero fatto lo stesso.

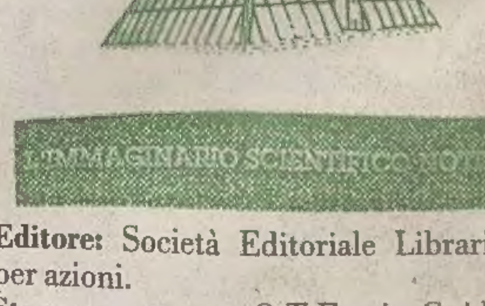
Poi chiamò Benoit. I portatori avevano terminato l'ossigeno a 150 metri dalla vetta e non volevano proseguire. Lasciarono il treppiede nella neve e scesero. Cosa fare? Benoit decise di scendere con gli sherpa per ritentare il giorno dopo. La probabilità di riuscita del nostro esperimento era ridotta a un terzo, anche se c'erano altri tre scalatori che potevano tentare la vetta nei giorni successivi. Fin dall'inizio del progetto, avevo considerato la possibilità del mancato arrivo in vetta degli strumenti. Ma era duro da digerire. Due anni di lavoro per niente, era davvero una catastrofe. Avremmo dovuto ripiegare su di una misura di soli angoli, come quella effettuata 150 anni prima ai tempi del colonnello George Everest. Il colpo di grazia lo ricevemmo quella sera quando gli scalatori che erano saliti in cima ritornarono al Colle Sud e comunicarono di non avere acceso il GPS ma di averlo lasciato nella scatola termica in cima alla montagna. Era già buio quando Agostino mi comunicò che il giorno seguente Benoit con un altro scalatore, Oswald Santin, avrebbero ritentato la vetta. Per Benoit era un grosso rischio: uno che tenta la cima dell'Everest senza ossigeno, se scende è bruciato e non risale più.

Partirono alle due dopo mezzanotte dall'ultimo campo al Colle Sud. Arrivati all'anticima si fermarono, presero in spalla il treppiede e lo portarono in vetta. Quando Benoit mi comunicò che stava aprendo la scatola del GPS mi balzò il cuore in gola. «Quanti gradi ci sono?» chiesi. «Meno quindici» rispose lui. Tirai un sospiro di sollievo. Fino a -30°C eravamo a posto. Gli diedi istruzioni per l'avvio «Premi il tasto ON, aspetta che smetta di lampeggiare la scritta PLEASE WAIT e poi premi F1». Dopo alcuni interminabili secondi Benoit disse «Ho fatto, adesso c'è scritto MEASURING CHECK YOUR INPUT» e poi «GO GPS». Era il segnale convenuto con i cinesi per far partire i GPS in valle contemporaneamente. Per la prima volta un GPS si accendeva sulla vetta dell'Everest.

Ma non c'era tempo da perdere «Adesso lascia tutto così, vai da Oswald e montate il treppiede, noi accendiamo il Mekometro. Girate i prismi nella direzione del raggio laser». Dopo alcuni interminabili minuti vedemmo la luce rosso rubino del laser splendere sulla montagna riflessa dai prismi. Ci mettemmo a gridare e a saltare abbracciandoci, contagiando persino i nostri portatori.

La nostra misura era fatta. Sembrava di sognare, in ventiquattro ore una triste disfatta si era tramutata in una brillante vittoria.

Ardito Desio, al centro, saluta i membri della spedizione in partenza per Katmandu. Da sinistra a destra: Franco Palmieri, Alberto Beinat, Giorgio Poretti, Claudio Marchesini, Alessandro Caporali. La foto è di Gino De Min, anche lui della spedizione.



L'IMMAGINARIO SCIENTIFICO NOTIZIE

Editore: Società Editoriale Libraria per azioni.
Stampato presso: O.T.E. via Guido Reni, 1.
Pubblicazione registrata al Tribunale di Trieste, n. 773 del 24/1/'90.
Direttore responsabile: Margherita Hack.
In redazione: Simona Cerrato, Ettore Panizon.
Disegni e grafica: Giuliano Comelli.
Hanno collaborato: Aura Bernardi, Nicoletta Grandi, Paola Rodari, Nicoletta Tamburini.